

Optimisation multidisciplinaire sous incertitudes – application à la conception d'un lanceur

Brevault

Loïc

2^{ème} année

ONERA TIS – DCPS

CNES – DLA

Mail : loic.brevault@onera.fr

Tél : +33 1 80 38 66 88

Directeur de thèse : Rodolphe Le Riche (CNRS LIMOS / Ecole des Mines de St Etienne)

Encadrants ONERA : Mathieu Balesdent (DCPS) - Nicolas Bérend (DCPS)

Encadrant CNES : Jean Oswald (DLA)

Site : Palaiseau

Thèse financée par : Onera et CNES

Mots clés :

Multidisciplinary Design Optimization (MDO), gestion des incertitudes, conception de lanceurs

Contexte :

La conception de lanceurs est un problème d'optimisation impliquant de nombreuses disciplines (propulsion, trajectoire, aérodynamique, *etc.*) (Fig. 1). L'enjeu est d'optimiser les performances du lanceur (masse au décollage, coût d'exploitation, *etc.*) en agissant sur des variables de conception (masse d'ergol, loi de guidage, diamètre des étages, *etc.*), tout en satisfaisant des contraintes de conception (pression maximale en chambre de combustion, orbite finale à atteindre, zones de retombée des étages, *etc.*). Face à la complexité du problème à résoudre (multidisciplinaire, grand nombre de variables de conception, optimisation sous contraintes, *etc.*) l'utilisation de méthodologies adaptées de type MDO (Multidisciplinary Design Optimization) permettent de tenir compte simultanément de toutes les disciplines et d'améliorer les performances du processus de conception (qualité de la solution, coût calculatoire, *etc.*) (Balesdent *et al.* 2012). Cependant, lors des phases d'avant-projet, du fait de l'utilisation de modèles physiques simplifiés, le dimensionnement du lanceur obtenu risque d'être sensiblement remis en question lors des phases ultérieures du processus de conception utilisant des modèles physiques plus précis. La modification du dimensionnement impliquerait des rebouclages avec la première étape et donc une perte en temps de calcul et en coût de développement. La prise en compte des incertitudes en phase d'avant-projet est donc un enjeu essentiel pour garantir une solution optimale robuste aux incertitudes. Les incertitudes à prendre en compte sont de deux types : aléatoires (variabilité du système et de l'environnement) et épistémiques (méconnaissances des modèles physiques).

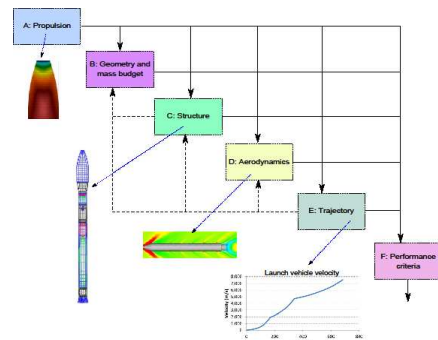


Figure 1 : Analyse multidisciplinaire pour la conception d'un lanceur

Objectifs Scientifiques :

L'objectif du travail proposé est de mettre au point des méthodologies MDO adaptées à la conception de lanceurs et prenant en compte les incertitudes, afin d'être capable non seulement de trouver la solution optimale mais aussi de garantir une solution aussi robuste que possible aux incertitudes prises en compte. On se focalisera sur une approche de MDO découplée permettant la parallélisation de l'évaluation des disciplines (facilitant ainsi le processus de conception) qui requiert alors une gestion des couplages interdisciplinaires sous incertitudes.

Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus :

La méthode de MDO la plus utilisée (MDF : Multi Discipline Feasible) repose sur une formulation couplée (Fig. 2). Dans cette approche, la cohérence entre les différentes disciplines est assurée par l'utilisation d'une MDA (Multidisciplinary Design Analysis). La MDA requiert l'évaluation itérative des disciplines pour déterminer la valeur des variables de couplage qui assurent la faisabilité multidisciplinaire (satisfaction des couplages) du lanceur. Afin de s'affranchir de l'utilisation répétée et coûteuse en temps de calcul de MDA, plusieurs formulations MDO découplées déterministes ont été développées (Balesdent *et al.* 2012). L'extension de ces méthodes découplées en présence d'incertitudes nécessite de gérer les variables de couplage incertaines (Fig. 3). Les approches existantes dans la littérature sont de trois types :

- satisfaction des couplages en moments statistiques (Xiong *et al.* 2012),
- satisfaction des couplages au point le plus probable de défaillance (Du *et al.* 2008),
- satisfaction des couplages « en instanciations » par construction des densités de probabilité des variables de couplage (Sankararaman *et al.* 2012).

La satisfaction des couplages « en instantiations » signifie que les couplages interdisciplinaires sont satisfaits pour toutes les valeurs possibles des variables incertaines. Les deux premières méthodes ne permettent pas de s'assurer de la satisfaction des couplages *en instantiations*. La troisième méthode ne permet plus de vérifier la cohérence (induite par les disciplines) entre les variables incertaines et les variables de couplages. Dans le cas de la conception d'un lanceur, le lanceur physiquement obtenu après construction correspond à une réalisation des variables incertaines. Une avancée importante serait d'être capable de garantir en phase d'avant-projet la faisabilité du lanceur (du point de vue de sa conception) quelle que soit la réalisation des variables incertaines.

Afin de garantir en phase d'avant-projet la faisabilité du lanceur *en instantiations*, la formulation MDO découplée doit répondre à un certain nombre d'exigences :

- non utilisation de MDA (pour découpler et s'affranchir de l'évaluation itérative des disciplines),
- satisfaction des couplages interdisciplinaires pour la solution optimale *en instantiations* (pour s'assurer de la faisabilité multidisciplinaire du système),
- satisfaction des contraintes de conception sous forme probabiliste (la prise en compte des incertitudes aboutie à une formulation probabiliste des contraintes de conception),
- estimation précise des contraintes probabilistes tout en ayant un coût de calcul le plus faible possible (pour des probabilités de non satisfaction de contraintes de conception de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5}).

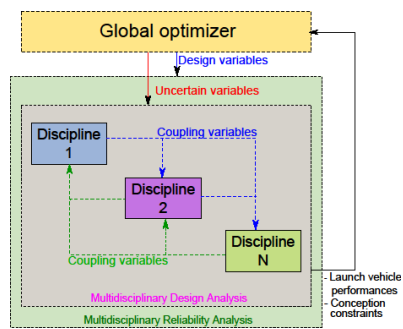


Figure 2 : Processus couplé de MDO sous incertitudes.

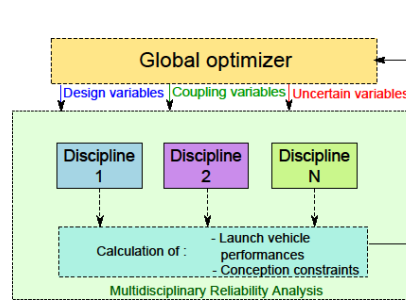


Figure 3 : Processus découplé de MDO sous incertitudes.

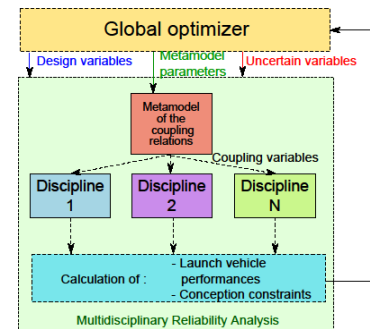


Figure 4 : IDF-PCE : processus découplé de MDO sous incertitudes par construction itérative de métamodèles des couplages.

Pour répondre à ces exigences, la méthode proposée « IDF-PCE » (Individual Discipline Feasible – Polynomial Chaos Expansion) est une formulation MDO découplée sous incertitudes. Des modèles de substitution des relations de couplage sont construits itérativement au cours de l'optimisation. Ces « métamodèles » doivent être créés dans les zones distinctes nécessaires pour l'estimation des performances du lanceur et pour l'estimation des contraintes de conception probabilistes (Fig. 5-6).

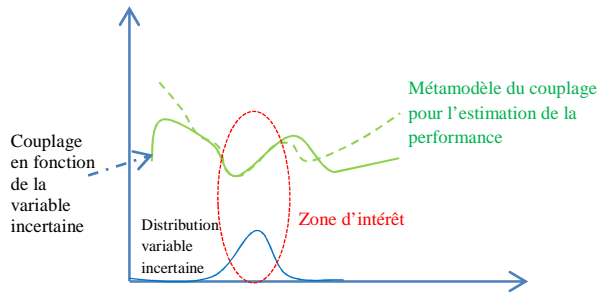


Figure 5 : Métamodèle du couplage pour l'estimation des performances du lanceur.

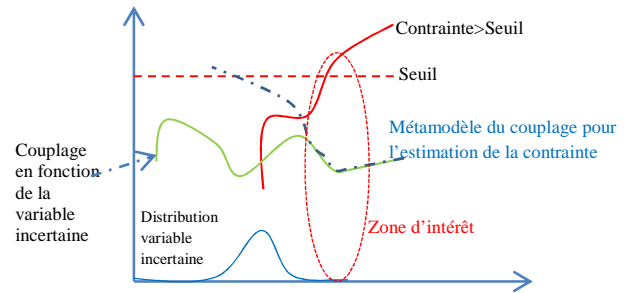


Figure 6 : Métamodèle du couplage pour l'estimation d'une contrainte probabiliste de conception.

Les métamodèles des couplages sont construits par polynômes du chaos. Ces derniers permettent une décomposition fonctionnelle des variables de couplage sur des bases polynomiales en accord avec les densités de probabilité des variables aléatoires en entrée (Wiener, 1938). La méthode *IDF-PCE* a été appliquée sur un cas test analytique impliquant deux disciplines sans contrainte de conception (Brevault et al. 2013, Atlanta). Ce cas test inclus trois variables de conception, trois variables incertaines et deux variables de couplage. Le Tableau 1 synthétise les résultats obtenus. Les Figures 7 et 8 représentent les distributions d'une variable de couplage, pour le cas test, respectivement par MDF sous incertitudes et par *IDF-PCE*. La Figure 9 représente la distribution de l'erreur en pourcentage entre la MDF et *IDF-PCE* pour une variable de couplage.

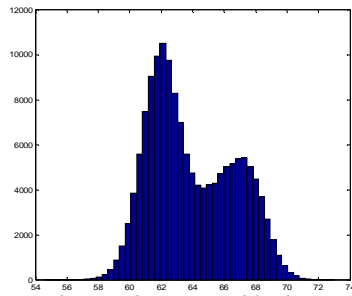


Figure 7 : Distribution d'une variable de couplage par une approche MDF sous incertitudes.

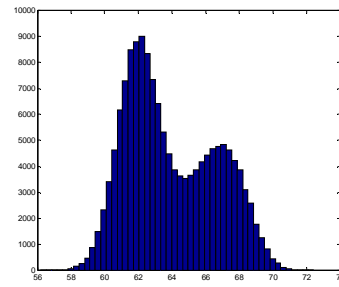


Figure 8: Distribution d'une variable de couplage par l'approche IDF-PCE.

On constate la même distribution pour la variable de couplage incertaine dans les deux approches. De plus, la méthode *IDF-PCE* permet de diminuer le nombre d'appels aux disciplines (Tableau 1).

Tableau 1: Comparaison MDF sous incertitudes IDF-PCE (cas test extrait de (Brevault et. al. 2013, Atlanta))

| Méthode | MDF sous incertitude | IDF-PCE |
|-------------------------------------|----------------------|---------|
| Erreur en moyenne sur les couplages | 0% | 0.34% |
| Nombre d'appels aux disciplines | 1 210 500 000 | 161 040 |

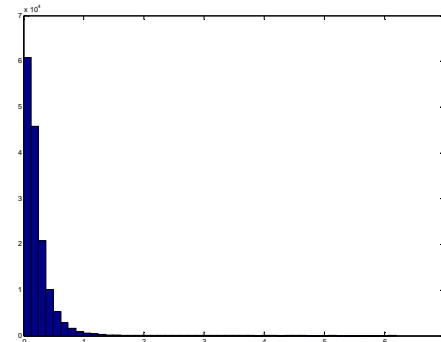


Figure 9 : Distribution de l'erreur en % entre la MDF et IDF-PCE pour les couplages.

Perspectives :

La formulation MDO découplée sous incertitudes avec contraintes probabilistes est en cours de test sur un problème analytique. Ensuite, cette méthode devra être testée sur un cas test de conception de lanceurs. Par la suite, la gestion mixte de variables incertaines aléatoires et épistémiques devra être mise en œuvre.

Bibliographie :

- Balesdent, M., Bérend, N., Dépincé, P., and Chriette, A. (2012). A survey of multidisciplinary design optimization methods in launch vehicle design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(5):619-642.
- Du, X., Guo, J., Beeram, H. (2008). Sequential optimization and reliability assessment for multidisciplinary systems design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35(2):117-130.
- Sankararaman, S., Mahadevan, S. (2012). Likelihood-based representation of epistemic uncertainty due to sparse point data and/or interval data. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(7):814-824.
- Xiong, F., Sun, G., Xiong, Y., Yang, S. (2012). A moment matching robust Collaborative Optimization method. 12th AIAA Aviation Technology Integration and Operation Conference. Sept. 2012, Indianapolis, Indiana, USA.
- Weiner, W. (1938). The homogeneous chaos. *American Journal of Mathematics*, 60(4) :897-936.

Liste des publications et congrès :

- Brevault, L., Balesdent, M., Bérend, N., Le Riche, R. (2013). Challenges and future trends in Uncertainty-Based Multidisciplinary Design Optimization for space transportation system design. 5th European Conference for Aerospace Sciences, Munich, Germany.
- Brevault, L., Balesdent, M., Bérend, N., Le Riche, R. (2013). Comparison of different global sensitivity analysis methods for aerospace vehicle optimal design. 10th World Congress on Structural and multidisciplinary Optimization, Orlando, Florida, USA.
- Brevault, L., Balesdent, M., Bérend, N., Le Riche, R. (submitted nov.2013). Decoupled UMDO formulation for interdisciplinary coupling satisfaction under uncertainty. 15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, Atlanta, Georgia, USA.
- Balesdent, M., Morio, J., Brevault, L. (submitted to Methodology and Computing in Applied Probability, sept. 2013). Rare event probability estimation in the presence of epistemic uncertainty on input probability distribution parameters.